

# 海上风力发电机组运行维护策略探讨

王嘉鹏

国电投江苏海上风力发电有限公司 江苏盐城 224544

**摘要:**海上风力发电机组长时间在露台环境下运行容易产生故障问题,不仅会影响风电场的正常生产,还会消耗成本、产生安全风险。为了满足现代风电场运行管理要求,在海上风力发电机组运行期间应该采取多样化的维护策略,及时发现故障隐患,保证发电机组的安全、可靠运行。文章简要概述海上风力发电机组特点,分析其在运行期间常见的故障问题,提出海上风力发电机组运行维护策略,为提高机组运行稳定性、保障机组安全性打下良好的基础。

**关键词:**海上风力发电机组;故障;运行维护

现代新能源技术的发展使得各行各业在建设的过程中都得到了较大的契机。近年来,我国风力发电技术水平逐步提升,传统的煤炭发电等形式逐渐被替代,在较大程度上减少了环境污染问题。但是海上风力发电机组在运行期间会受到较多因素的影响,尤其是需要应对恶劣的海上环境,很容易产生故障问题。这就需要做好相关的运行维护工作,解决因发电机组故障引发的停机问题,在提高发电质量的同时产生更高的发电效益。

## 一、海上风力发电机组特点

第一,高效性。海上风速通常比陆地高20%,且风力更稳定,使得风机单机容量更大,能量效益比陆地风电场高20%~40%<sup>[1]</sup>。海上风电场大多建设于沿海地区,直接服务于经济发达、用电需求高的中东部沿海区域,减少了电能远距离输送的损耗和电网压力,便于就近消纳。

第二,环境适应性。在海上建立发电厂不会占用土地资源,可以避免陆上风电可能带来的噪声、景观影响等问题,其远离人群,对于生态环境的干扰较低。同时,海面风沙少,机组磨损较小,有利于延长使用寿命。

第三,技术先进性。近几年的海上风力发电机组在建设期间逐渐实现了技术创新,并且往大型化趋势发展。一些机组的叶片长度已达230m以上,甚至出现270m的超长叶片,漂浮式风电机组可在深海部署,无需桩基固定,能够有效利用深远海风能资源。

第四,经济性。相对于陆地海上风力发电机组发电机组来说,海上风力发电机组的初始投资较高,但是在规模化开发的过程中,技术不断得到了创新,并且运维方式也持续优化,总体成本呈现下降趋势。

## 二、海上风力发电机组运行故障

### 1. 发电机故障

海上风力发电机组的运行需要以发电机作为根本支撑,但是其在运行期间容易产生绕组故障、转子故障、轴承故障、过热故障、电气控制系统关联故障等问题,这些故障大多与海上恶劣环境、机械应力等有关,运维人员需要针对具体的故障问题进行具体分析。发电机绕组故障表现为定子绕组短路、断路或绝缘损坏,通常因过载运行、绝缘老化或电压波动导致,产生故障问题之后输出功率会直接下降甚至可能无法工作。转子故障以转子线圈断裂、不平衡或磁极损坏为主,可能由长期运行疲劳、制造缺陷或振动冲击引起,影响发电电压稳定性。轴承容易在发电机运行期间出现磨损、振动异常或者温度过高等情况,主要原因是润滑不足、安装不当或负载不均,严重时可能导致转子与定子摩擦<sup>[2]</sup>。过热故障表现为散热系统失效、过载运行或绝缘老化,可能引发绕组温升超标,导致效率降低或停机。电气控制系统关联故障表现为传感器或控制器失灵,可能间接影响发电机运行,例如因信号误差导致控制失准。

### 2. 叶片故障

在恶劣的海洋环境下,海上风力发电机组叶片可能出现裂纹与结构损伤、腐蚀、雷击损伤、表面污染与失衡、材料疲劳与老化等现象。机组在长期运行期间会使得叶片在风载作用下易产生微观裂纹,积累后可能扩展成宏观裂纹,出现台风阵风等极端天气时可能导致叶片过载断裂。腐蚀问题的产生与沿海地区的盐雾环境有会直接关系,直接腐蚀叶片表面胶衣,导致纤维层暴露和损伤,加速老化。当叶片被雷电击中时,会产生瞬时高

温，引起内部开裂或爆炸性破坏。叶片上经常会积累油污、盐垢等破坏叶片翼型，影响气动效率，盐雾沉积还可能引起质量不平衡。在交变荷载下，叶片会出现材料疲劳现象，表现为树脂开裂或分层。

### 3. 变桨系统故障

海上风力发电机组的变桨系统由于海上环境潮湿、盐雾腐蚀严重等在处理过程中具有较大的挑战性。常见的变桨系统故障有变桨电机故障、变桨控制系统故障、电源与供电故障、通信故障、后备电源故障、位置与传感器故障、液压系统故障、通风与加热故障等。变桨电机故障表现为电机过热、绕组短路、轴承磨损或损坏，导致叶片无法正常调整角度。变桨控制系统故障会涉及控制器硬件损坏、软件错误或传感器失效，造成控制失灵<sup>[3]</sup>。当变桨系统供电中断或者出现电压异常问题时，电缆会被腐蚀或者出现连接器问题，产生电源与供电故障。通信系统故障的产生原因是系统内部或者与主控通信中断，导致控制信号无法传递。后备电源故障的引发原因是蓄电池组容量衰减或逆变器出现故障，影响紧急顺桨功能。当桨距位置传感器、旋转编码器数据溢出或产生限位开关故障时，会导致角度测量不准，引发位置与传感器故障。液压系统故障包括液压泄漏、压力不足或阀门故障。通风与加热故障的产生原因是柜内通风不良或加热器失效，可能引发湿气积聚或元件损坏。上述故障问题都可能引发叶片调节失灵、功率输出不稳定或机组停机，运维人员要注意防腐蚀检查和定期维护。

### 4. 齿轮箱故障

齿轮箱故障集中在齿轮、轴承、轴等部件上，分析故障问题时，需要以实际情况为主，明确产生故障的原因和后果。齿轮故障在海上风力发电机组运行期间比较常见，齿轮会在反复接触应力作用下出现麻点、浅层或硬化层疲劳剥落，表现为局部金属剥落，这类故障通常伴随齿轮啮合频率的调制特征和振动能量增大<sup>[4]</sup>。齿轮在运行期间会由于润滑不良、杂质进入或齿轮材料问题等产生磨粒磨损、腐蚀磨损或冲击磨损，导致齿形改变、噪声增大。在重载或高速工况下，润滑油膜破裂会导致齿面金属直接摩擦，形成沟纹和擦伤，常伴有噪声突增。轴承故障的主要形式为疲劳剥落、磨损、断裂等，故障特征频率会在振动信号中显现，轴承损坏时会引发齿轮啮合状态变化，加剧齿轮故障。轴和轴系故障的产生经常是由于轴的弯曲、不平衡或联轴器不对中等产生的，会导致振动加剧和传动不稳，进而影响齿轮和轴承的寿命。

## 三、海上风力发电机组运行维护策略

### 1. 完善检修维护制度

海上风力发电机组运行维护与普通的设备运行维护工作存在显著的区别，建设单位应该考虑机组的特殊运行环境，明确其可能受到的高湿度、盐雾腐蚀、海况等影响，在通用维护框架的基础上完善检修维护制度，加强运行维护实效性与规范性。开展制度设计时需要遵循“安全第一、预防为主、专业规范、数据驱动”的原则，考虑海上作业的复杂环境、高运维成本，在构建和完善检修维护制度时重点突出风险预控和可靠性提升，目标是最大限度减少非计划停机时间，延长设备寿命。建设单位应该完善设备管理制度，将其作为检修维护的基础，建立完整的设备清单，详细记录风力发电机组、变流器、电缆等关键设备的基本信息、使用状况和维修历史。建设安全管理制度时，要以人员安全培训和巡检制度的建设和实施作为要点，定期组织运维人员开展专项安全培训，配合设备巡检制度做好日常检查与定期检查工作，及时发现并消除设备运行期间的安全隐患。建设单位还应构建完善的运行与监控管理制度，通过运行监控系统对机组的功率、转速、温度等运行参数进行实时监测，及时发现异常工况，分析历史数据为预测性维护提供依据，优化维护策略。

### 2. 做好日常检修维护

第一，设备检查与监控。运维人员要对机组各部件进行全面检查，将目视检查叶片、塔筒、机舱等外部结构是否有明显损伤、腐蚀或异物附着作为基础的工作内容，通过监控系统分析运行数据，明确发电机温度、齿轮箱油压、振动值等参数，评估设备健康状况并预测潜在故障。

第二，清洁与防腐。设备在运行期间应该保持清洁，才能够减少后期故障问题的产生。运维人员在工作期间应该定期清理叶片表面的积尘、海盐结晶或鸟类粪便，避免影响气动性能或造成腐蚀。与此同时，需要检查并维护塔筒、机舱等金属部件的防腐涂层，及时修补脱落区域，防止海洋环境下的加速腐蚀。

第三，润滑与紧固。齿轮箱、轴承等传动部件经常会出现磨损故障，运维人员要按计划添加或更换润滑油脂，确保运转顺畅，减少磨损。在运维期间应该检查并且以规定力矩拧紧各连接螺栓，防止因振动导致松动。如果发电机组的运行环境温度较低，则需要注意力矩的特殊调整。

第四，关键部位专项维护。运维人员要在日常检修

维护期间检查叶片表面是否有裂纹、雷击损伤或排水孔堵塞，并进行必要的修补或清洁。检查变桨系统的运行情况时，要维护变桨轴承、减速箱及控制柜，确保其灵活可靠运行，还要检查齿轮箱与轴承的油位、密封性及运行噪声，及时处理渗漏或异常振动。

### 3. 引进现代技术方法

第一，数字化运维平台与远程监控。利用传感器、物联网技术和大数据分析的方法实时监控风电机组运行状态，运维人员可以在陆地控制中心远程监测振动、温度、油液质量等关键参数，提前预警潜在故障，减少不必要的海上作业。

第二，预测性维护。基于机器学习和人工智能的预测性维护技术，分析历史运行数据和实时传感器信息，预测设备故障的发生时间，通过对现代技术的应用优化检修计划，避免计划外停机，从而延长设备的使用寿命。

第三，无人机与机器人巡检。利用无人机对风机塔架、叶片等高空部位进行视觉检查，快速识别表面损伤、腐蚀或裂纹，减少人工攀爬的风险。运维人员可以引进爬壁机器人等机器人技术检测内部结构，评估叶片内部裂纹或轴承状态，提高检查的精度和安全性。

第四，智能诊断与专家系统。将故障数据库和规则引擎相互结合形成专家系统，辅助运维人员快速诊断复杂故障，在实际诊断故障的过程中，基于相对应的问题分析历史案例，确定产生故障的原因，指导处理步骤，提高运维管理效率。

### 4. 采用故障监测装置

第一，专用监测装置。以激光与光传感器组合装置、防雷导通性检测装置为主，前者的装置组成包括固定在支撑结构上的激光发射器和光传感器，通过发射激光束并接收反射信号监测目标的状态，可用于检测异物附着、表面损伤或位移等，还能够集成自动清扫功能，保持传感器的清洁，提高监测精度。后者专门用于检测叶片接闪器等风电机组防雷系统的导通性能，运维人员要在塔筒内部设置导通件并与电阻检测仪连接，提高检测安全性与效率，降低传统检测方式的风险和周期。

第二，传感器网络。利用光纤传感器这种无源器件，不需要外部供电并且信号可以直接通过光纤传输，完全不受雷击和电磁干扰影响，可靠性高、寿命长。将传感器网络集成到叶片和塔筒中，用于实时监测载荷、振动、应力、温度等多种状态参数，实现叶片和塔筒健康状态在线监测。此外，还可以利用加速度传感器、位移传感

器等监测齿轮箱、轴承、发电机等传动链部件的振动、温度等信息。

第三，集成化智能监测系统。利用先进的算法分析处理各类传感器采集的数据，形成更高层次的智能诊断系统。借助AI技术构建全生命周期监测方案，持续捕获设备运行中的细微异常数据，实现从传统的“事后检修”向“事前预测”的转变，降低非计划停机和维修成本。

### 5. 制定应急响应机制

第一，构建应急组织体系。以应急领导小组、应急办公室、专业救援队伍、信息联络组的建设作为要点，形成可以统一指挥和协调的应急组织体系，发生紧急事件时启动应急响应，及时开展现场搜救、抢险和救治工作，准确传递现场信息，加强运维工作实效性。

第二，完善应急响应流程。在运维期间按照预案启动相应级别的响应，专业救援队伍应该赶往现场开展人员搜救、伤员救治、设备抢修、秩序维护和次生灾害防范等行动，应急办公室需要统筹调配人力、物资、船舶和直升机等应急资源，确保救援高效有序。

第三，完善保障与恢复机制。开展事后控制工作时，建立应急物资储备库，确保通讯、交通等基础设施的稳定运行，为救援提供基础支撑。持续收集和报告灾情及救援进展，事件结束后进行总结评估，分析经验教训，持续改进应急预案。

### 结语

落实海上风力发电机组运维工作时，应该完善检修维护制度、做好日常检修维护工作、引进现代技术方法、采用故障监测装置、制定应急响应机制等，以此提高风电场发电量和风电机组稳定性，规避严重故障机大型事故，为社会提供优质的绿色电力能源。

### 参考文献

- [1] 罗四海. 风力发电机组控制及运行维护技术分析[J]. 中国设备工程, 2025, (21): 43-45.
- [2] 赵海燕, 李红峰, 宋恭杰, 等. 海上风力发电机组高效维护关键工艺研究与应用[J]. 能源工程, 2025, 45(03): 118-124.
- [3] 谭霖, 张欣, 陈仕祥. 风电场风力发电机组运行故障及维护策略研究[J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(09): 108-110.
- [4] 王双林. 海上风电场风力发电机状态监测与运行维护策略[J]. 海峡科学, 2024, (08): 48-51.